UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

CASE POSTALE 6128, SUCCURSALE A, MONTRÉAL, QUÉBEC, H3C 3J7

UNE MÉTHODE D'OPTIMISATION POUR LE CONTRÔLE EN TEMPS-RÉEL DES CAMIONS DANS UNE MINE À CIEL OUVERT

par

François Soumis*, Jean Éthier*,
et Daniel McInnis*

*Département de mathématiques appliquées,
École Polytechnique de Montréal.

Cette étude a été publiée grâce à une subvention du fonds F.C.A.R. pour l'aide et le soutien à la recherche.

Université de Montréal
Centre de recherche sur les transports - Publication #466
Avril 1986

Dépôt légal - 3e trimestre 1987

RÉSUMÉ

Nous proposons une méthode de contrôle en temps-réel basée sur des modèles d'optimisation. La modélisation mathématique utilise la programmation linéaire entière, un réseau à coût non-linéaire et un problème d'affectation. Le système améliore le contrôle des opérations et permet de plus une meilleure planification de la production grâce à des outils d'aide à la décision pour l'allocation des équipements et le choix du compromis entre la qualité et la quantité du minerai.

Mots-clés :

camions miniers, contrôle, affectation, temps-réel, optimisation.

— — — — — — —

ABSTRACT

We propose an advanced truck dispatching system using mathematical optimization algorithms. This model uses integer programming, non-linear network and assignment problem. The system improves operation control compared to existing algorithms. Furthermore, it provides planning tools for choosing equipments and setting an equilibrium between quality and quantity of production.

Key-words :

open pit, truck, dispatching, optimization.

1. INTRODUCTION

Depuis quelques années, il existe de nombreux systèmes de contrôle en temps-réel pour les camions dans une mine à ciel ouvert : [White 81], [Young 84], [Orisek 86]. Pour réaliser le contrôle, on utilise généralement un matériel sophistiqué de télécommunication pour détecter en temps-réel l'activité des camions et des pelles. Un ordinateur utilise cette information pour décider de l'assignation des camions aux pelles dans le but de maximiser la production et/ou de contrôler la qualité du minerai extrait. Le contrôle vise donc essentiellement la production. Or, préalablement à la production on doit réaliser une fonction de planification qui consiste à choisir parmi les équipements disponibles (pelles et camions) ceux qui seront opérationnels et les zones de la mine à exploiter. De toute évidence la qualité des choix faits à l'étape de planification influe sur la qualité du contrôle, car elle détermine la difficulté des problèmes de contrôle et, par conséquent, la productivité résultante. Nous proposons donc un système de contrôle en temps-réel qui intègre à la fois les fonctions de planification et de contrôle.

2. DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SYSTÈME

La fig. 1 illustre le schéma général du système et son interaction avec l'environnement minier. Le système informatique permet de réaliser les trois étapes dans le processus de planification-production : le choix des équipements, le calcul du plan opération, et le contrôle en temps-réel. Le planificateur est responsable des deux premières étapes. Il choisira d'abord quels sont les équipements à opérer pour atteindre ses objectifs de production et de qualité. Le choix se fait en interaction avec l'ordinateur par la fonction choix des équipements. Lorsqu'un choix d'équipement est fait, il est transféré à la fonction calcul du plan opération où est calculé l'estimé de la production. Le planificateur peut alors

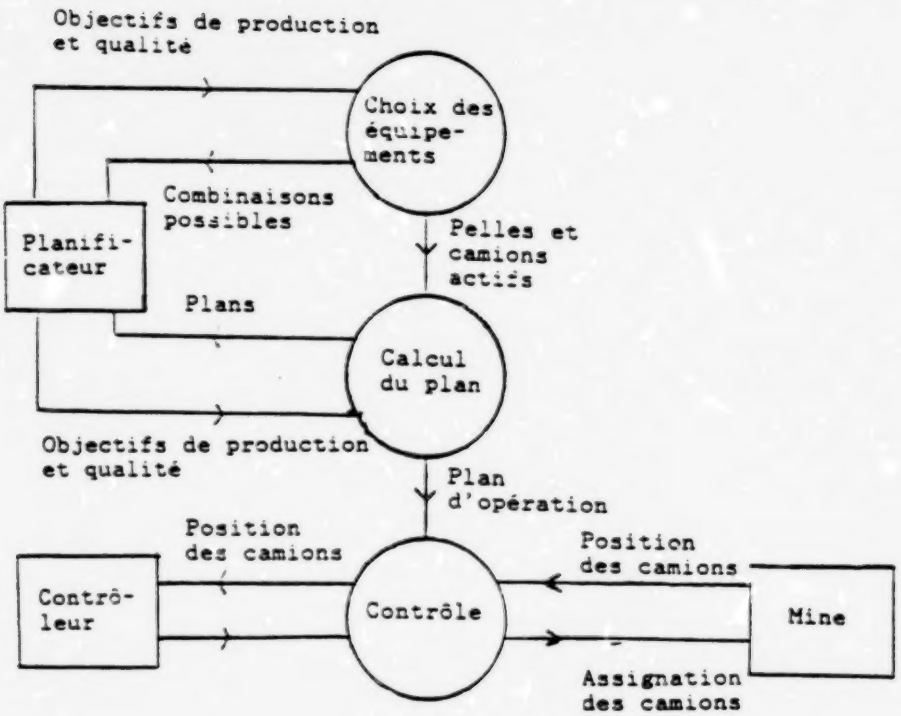


Fig. 1 : Schéma du système.

réviser ses objectifs, réviser son choix d'équipement et recommencer le calcul ou accepter ce plan. Un plan accepté sera transféré à la fonction contrôle en temps-réel où il servira de critère à l'assignation des camions.

La fonction contrôle est liée directement à la production. Elle interagit d'abord avec la mine en détectant la position des camions et en transmettant les assignations aux camions via un canal de télécommunication. Il y a aussi interaction avec le contrôleur qui peut observer sur un écran le déplacement des camions et signaler à l'ordinateur les bris d'équipement.

2.1 Choix des équipements

La première étape du processus planification-production consiste à déterminer l'équipement à utiliser pour atteindre les objectifs de quantité et de qualité : le nombre de camions, le nombre de pelles et les zones de la mine à exploiter.

Du côté camions, il y a peu de marge de décision; les chauffeurs devront être prévenus à l'avance de leur horaire de travail. Le nombre de camions prévus est donné comme paramètre d'entrée. Exceptionnellement, si le nombre de camions n'est pas suffisant pour atteindre les objectifs, on pourra ajouter quelques conducteurs à la dernière minute s'il y a des véhicules en état de rouler. De même, si le nombre de camions excède le besoin, on le diminue en immobilisant temporairement quelques-uns. Dans de tels cas on recommence en modifiant le paramètre donnant le nombre de camions.

Du côté des pelles, on connaît l'ensemble des pelles en état d'opérer et leurs localisations dans la mine. Chaque pelle a accès à quelques bancs de matériaux aux propriétés différentes (1 à 4 bancs). Notons qu'il n'est pas facile de déplacer une pelle sur une longue distance car il s'agit de pelles électriques alimentées par câbles. Les horaires de travail fournissent un nombre d'opérateurs de pelle disponibles et on voudra en général qu'ils travaillent tous. Donc, le problème consiste à déterminer les pelles actives et les bancs associés de façon à atteindre au mieux les objectifs de quantité et de qualité de minerai.

Ce problème peut être approximé par un modèle de programmation linéaire avec variables entières en exprimant les objectifs de qualité sous forme de contraintes. La formulation utilise les paramètres suivants:

$\{i|i=1,\ldots,I\}$: l'ensemble des pelles disponibles.

$\{j|j=1,\ldots,J_i\}$: l'ensemble des bancs de minerai accessibles par la pelle i.

$\{k|k=1,\ldots,K\}$: l'ensemble des facteurs de qualités considérés (teneur, taux d'impuretés, ...).

T_{ij}^k : valeur du $k^{ième}$ facteur de qualité du minerai du banc j accessible par la pelle i.

A^k, B^k : valeur minimum et maximum acceptables du $k^{ième}$ facteur de qualité dans le mélange de minerai extrait.

N : nombre d'opérateurs de pelles disponibles.

C : production maximum d'une pelle.

Les variables du problème sont les suivantes :

p_{ij} : taux de production de la pelle i dans le banc j.

x_{ij} : variable binaire prenant la valeur 1 si la pelle i est en opération dans le banc j.

Le modèle se formule de la façon suivante :

$$\max C \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J_i} p_{ij} \qquad [1]$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} x_{ij} \leq 1 \qquad i=1,\ldots,I \qquad [2]$$

$$\sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J_i} x_{ij} \leq N \qquad [3]$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad [4]$$

$$0 \leq p_{ij} \leq x_{ij} \qquad i=1,\ldots,I,\ j=1,\ldots,J_i \qquad [5]$$

$$A^k \leq \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J_i} p_{ij} T_{ij}^k \Big/ \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J_i} p_{ij} \leq B^k \qquad k=1,\ldots,K \qquad [6]$$

L'objectif [1] maximise la production, la contrainte [2] limite chaque pelle à un seul banc, la contrainte [3] limite le nombre de pelles actives au nombre d'opérateurs. La contrainte [5] assure que le taux de production est nul si la pelle n'est pas active dans ce banc et entre 0 et 1 si elle y est active. Finalement la contrainte [6] assure que la teneur du mélange est entre les bornes pour chacun des facteurs de qualité.

Ce problème avec variables binaires est très difficile à résoudre car en relaxant la contrainte d'intégrité [4] on peut généralement obtenir la production maximum C.N tout en satisfaisant les contraintes de qualité en utilisant des fraction de pelles travaillant en plus de N position. De telles solutions fractionnaires à 100% de production peuvent aussi être obtenues même si plusieurs variables ont été fixées dans l'arbre d'énumération. La résolution par énumération implicite est donc peu efficace : il faut descendre très profondément dans l'arbre avant d'obtenir des solutions entières et il n'y a pratiquement pas d'élimination par bornes à cause de la présence des nombreuses solutions fractionnaires à 100% de production.

Par contre, si on fixe les variables binaires x_{ij}, le problème résiduel [1] [5] [6] peut être résolu très efficacement. En effet, avec l'algorithme dual du simplexe on obtient des solutions optimales après 2-3 pivots en utilisant comme solution initiale des taux de production $p_{ij} = x_{ij}$. C'est beaucoup plus rapide qu'avec un algorithme primal utilisant comme solution initiale les taux de production $p_{ij} = 0$. En effet, les solutions optimales cherchées sont beaucoup plus près de la production maximale C.N que de la production nulle.

Pour résoudre le problème global [1] à [6], nous proposons une approche combinant la puissance de calcul de l'ordinateur et le jugement de l'opérateur. L'ordinateur est utilisé pour évaluer la production maxi-

male satisfaisant les contraintes de qualité pour différentes combinaisons de la position des pelles. En utilisant l'algorithme dual on peut évaluer plus de 2000 combinaisons par minute sur un PDP-11. L'opérateur restreint le nombre de combinaisons des positions des pelles en fixant des paramètres décrivant le type de solutions souhaitées. Il détermine le nombre de pelles opérant dans le minerai, le nombre dans le stérile, le nombre dans chaque mine. De même, il limite les choix de bancs pour chaque pelle suivant les priorités et les préférences. L'opérateur demande alors à l'ordinateur combien de combinaisons sont possibles sous ces conditions et obtient un estimé du temps de calcul nécessaire pour toutes les évaluer. Si le temps de calcul est jugé raisonnable l'opérateur demande l'évaluation et obtient les meilleures combinaisons dans l'ordre décroissant de production. Si le temps de calcul estimé est trop grand l'opérateur peut préciser ses préférences pour restreindre les possibilités. Si les meilleures combinaisons de localisations évaluées ne sont pas satisfaisantes du point de vue de la production, l'opérateur peut modifier ses préférences pour explorer d'autres localisations.

Cette étape de planification est réalisée au début des quarts si on modifie les objectifs, le nombre d'opérateurs de pelles ou le nombre de conducteurs de camions. Elle est aussi réalisée au besoin durant un quart de travail si un bris d'équipement ou une autre perturbation vient modifier les conditions de fonctionnement.

2.2 Plan d'opération

La seconde étape du processus planification production consiste à déterminer un plan d'opération pour l'équipement choisi. Le nombre de camions, le nombre de pelles et leur localisation sont fixés. Le plan détermine le niveau d'activité de chaque pelle et les itinéraires des camions réalisant le mieux les objectifs de qualité et de quantité de minerai transporté.

Nous proposons à cette étape un modèle plus réaliste du problème de transport de minerai que les modèles de planification utilisant la programmation linéaire. Les modèles linéaires tel celui proposé par White [83] ne considère pas l'augmentation de l'attente quand on approche la limite de capacité d'une pelle ou du concasseur. De plus, ils traitent les exigences de qualité en imposant des limites inférieures et supérieures sur la teneur et les autres paramètres du mélange. De tels modèles produisent des solutions extrémistes : certaines pelles sont au maximum de leur capacité et d'autres peu utilisées. Dans certains cas, deux pelles dans le même type de minerai peuvent avoir des niveaux d'activité différents. De plus, les solutions sont généralement aux limites des intervalles acceptés pour les paramètres de qualité. De telles solutions sont acceptables en première approximation pour le choix de localisation des pelles, mais ne peuvent servir de plan pour les opérations en temps-réel.

Pour obtenir un plan plus réaliste, nous proposons un modèle de programmation non linéaire intégrant la croissance des temps d'attente avec la congestion des pelles et du concasseur et réalisant un équilibre entre la quantité et la qualité. Le plan d'extraction est déterminé en résolvant un problème de réseau à coûts non-linéaires. Un exemple de réseau est présenté à la fig. 2.

Introduisons maintenant les notations suivantes :

N : l'ensemble des noeuds du réseau : concasseur, pelles, dépots de stérile, noeuds d'attente, carrefour de chemins.

P : l'ensemble des arcs de parcours (chemins entre les neouds).

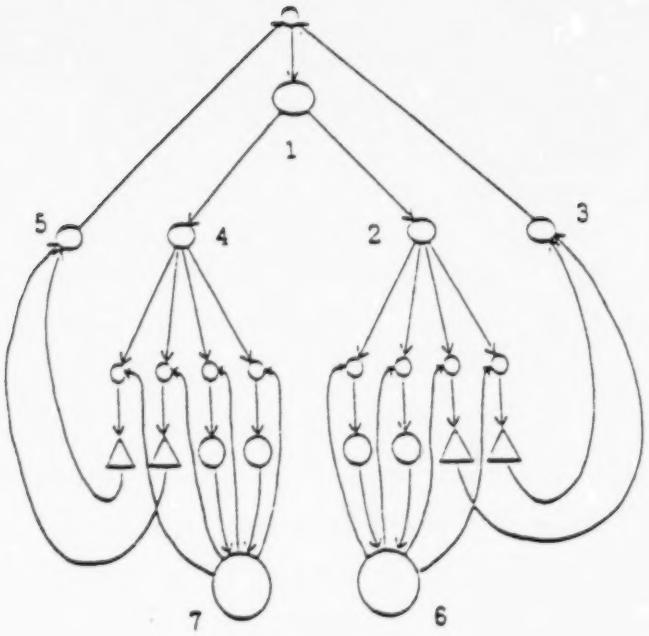
A : l'ensemble des arcs d'attente, reliant les noeuds d'attente aux pelles et au concasseur.

B : l'ensemble de tous les arcs B = A U P

AM : le sous-ensemble des arcs d'attente incident aux pelles de minerai.

AS : le sous-ensemble des arcs d'attente incident aux pelles de stérile.

AP : l'ensemble de tous les arcs d'attente aux pelles AP = AM U AS.



Pelles de stérile

Pelles de minerai

Noeuds d'attente

1 - Concasseur
2 - Entrée de mine "A"
3 - Sortie de mine "A"
4 - Entrée de mine "B"
5 - Sortie de mine "B"
6 - Dépôt de stérile "A"
7 - Dépôt de stérile "B"

Fig. 2 : Structure du réseau de la mine du Mont-Wright.

Θ_i : l'ensemble des arcs de B ayant le noeud $i \in P$ pour origine.

T_i : l'ensemble des arcs de B se terminant au noeud $i \in P$.

M_a : pour $a \in AP$, M_a indique le nombre maximum de voyages pouvant être chargé par pelle accessible par cet arc.

Introduisons les variables :

X_a : le nombre de voyages de camion pendant la période de planification sur l'arc $a \in B$.

Un premier terme de l'objectif assure la maximisation de la production en tenant compte de la capacité des pelles. Ce terme assure de plus une répartition entre les pelles bien meilleure qu'une somme pondérée de la production de chaque pelle. Les paramètres V_1 et V_2 permettent de pondérer différemment les productions de minerai et de stérile.

$$C_1(X) = V_1 \sum_{a\varepsilon AM} (X_a - M_a)^2 + V_2 \sum_{a\varepsilon AS} (X_a - M_a)^2 \qquad [7]$$

Un second terme assure que le temps total d'utilisation des camions correspond à la disponibilité. Le temps d'utilisation comprend les temps de chargement et de déchargement, les temps de déplacement et les temps d'attente.

$$C_2(X) = V_3\Big(\sum_{a\varepsilon AP} (C_a + D_a)\, X_a + \sum_{a\varepsilon P} d_a X_a + \sum_{a\varepsilon A} A_a(X_a) X_a - D\Big)^2 \qquad [8]$$

Les paramètres C_a et D_a sont les temps de chargement et de déchargement moyens pour la pelle accessible par l'arc a. Le temps de déchargement peut être associé à la pelle car le point de déchargement est déterminé par le point de chargement. Le paramètre d_a est le temps de parcours moyen de l'arc a. La fonction $A_a(X_a)$ mesure l'attente moyenne des camions sur l'arc a. Il s'agit d'une fonction non-linéaire croissante de X_a estimée à l'aide de la théorie des files d'attente. Le paramètre D correspond à la disponibilité D = nombre de camions fois la durée de planification considérée. Le paramètre V_3 est ajusté pendant la résolution pour obtenir la précision désirée sur le temps d'utiisation des camions.

D'autres termes sont ajoutés pour chacun des objectifs de qualité

$$C_3(X) = \sum_{k=1}^{K} f_k\Big(\sum_{a\varepsilon PM} T_a^k X_a \Big/ \sum_{a\varepsilon PM} X_a \Big) \qquad [9]$$

La fonction $f_k(\bullet)$ est propre à chaque objectif de qualité. La constante T_a^k est la valeur du $k^{ième}$ facteur de qualité du minerai chargé par la pelle accessible par l'arc a.

Par exemple, pour approcher la teneur moyenne désirée, nous utilisons la fonction de pénalité présentée à la fig. 3.

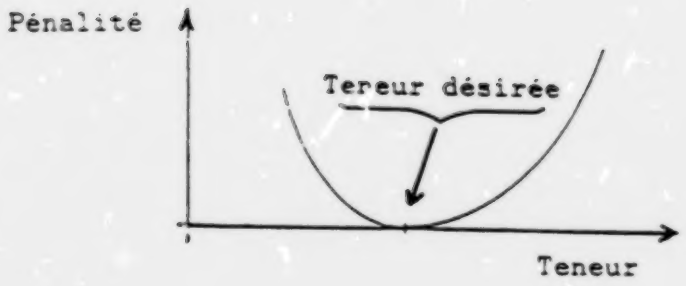


Fig. 3 : Pénalité associée aux écarts de teneur.

La branche de droite mesure la valeur du fer perdu dans les rejets du concentrateur quand la teneur du minerai dépasse la valeur pour laquelle il est ajusté. La branche de gauche mesure la perte de qualité du concentré et la réduction du prix de vente quand la teneur du minerai décroît. Ainsi le modèle réalise l'équilibre économique entre le tonnage et la qualité. On diminue le tonnage pour augmenter la qualité seulement si c'est rentable.

Le plan d'opération est solution du problème suivant :

$$\min C_1(X) + C_2(X) + C_3(X)$$

$$\sum_{a \in B^+(i)} X_a - \sum_{a \in B^-(i)} X_a = 0 \qquad i \in N \qquad [10]$$

$$0 \leq X_a \qquad a \in B$$

La contrainte [10] assure la conservation du flot de camions. $B^+(i)$ est l'ensemble des arcs entrant au noeud i, tandis que $B^-(i)$ est l'ensemble des arcs sortants.

Ce problème de réseau à coût non-linéaire se résoud assez facilement. Pour une mine avec 15 pelles et 5 points de déchargement le réseau comprend 40 noeuds et moins de 100 arcs. Un réseau de cette taille demande moins de 1 000 mots de mémoire et se traite même sur un petit ordinateur.

Nous avons développé pour sa résolution une implantation de l'algorithme du gradient réduit spécialisé pour ce type de problème. Notre algorithme réalise l'ajustement des différents paramètres pendant la résolution pour obtenir une solution ayant la précision désirée. Une solution donnant les nombres optimaux de voyages sur chaque routes a 3 chiffres significatifs est obtenu en 10 secondes sur PDP-11. Ce modèle à coût non-linéaire a l'avantage de produire des plans d'opération beaucoup plus stables que les modèles linéaires par rapport aux modifications des paramètres. La fig. 4 présente un exemple illustrant cette qualité du module; les nombres de voyages par pelle varient très régulièrement en fonction du nombre total de camions utilisés pour calculer le plan. Cette qualité facilite la tâche d'un opérateur qui ajuste les paramètres de l'exploitation en vue d'obtenir un plan permettant d'atteindre certains objectifs de production.

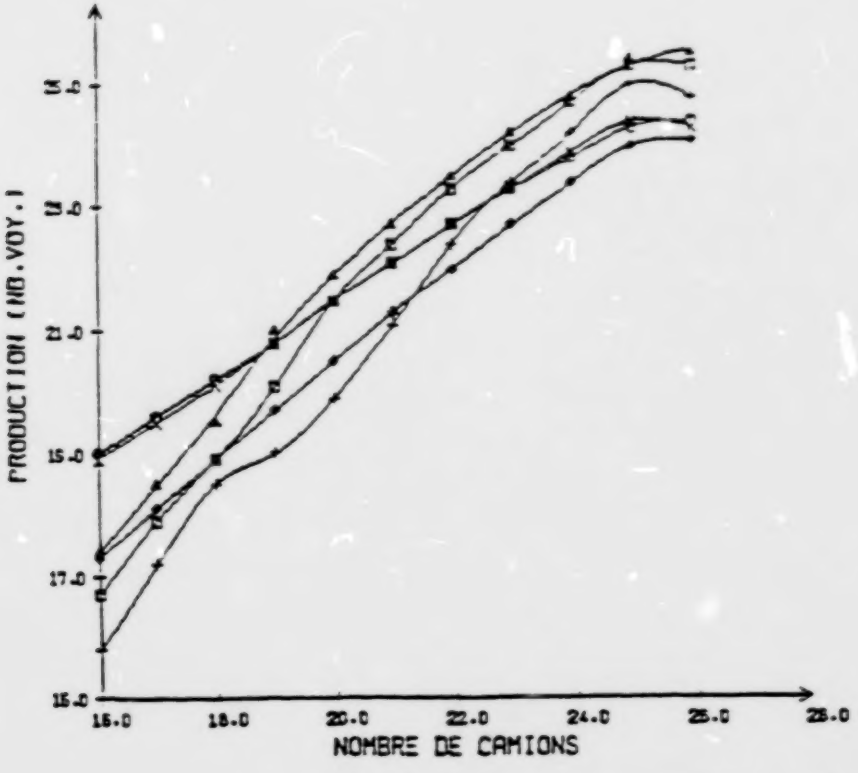


Fig. 4 : Nombre de voyages par pelle en fonction du nombre total de camions.

2.3 Contrôle en temps-réel

La dernière étape du processus de décision détermine en temps-réel l'affectation des camions. Après chaque déchargement, le système communique au camion son prochain point de chargement. Après son chargement, le camion se rend au point de déchargement qui est déjà fixé pour chaque pelle. Les décisions d'affectation sont prises de façon à réaliser au mieux le plan d'opération et ainsi obtenir les meilleures performances pour les objectifs de quantité et de qualité.

Le système de contrôle assure d'abord une fonction de communication. Cette fonction comprend la localisation des camions, l'évaluation des temps de parcours et de chargement et l'estimation des heures où chaque camion et chaque pelle deviendront disponibles; elle assure aussi la communication des assignations aux camions. La fig. 5 illustre le matériel utilisé.

D'un côté, il y a des bornes émettrices radio 1 placées à des endroits stratégiques dans la mine (intersection de routes, pelles, entrée des haldes, etc.). Chaque borne émet un signal unique qui est enregistré dans la boîte noire du camion 2 lorsque celui-ci passe près de la borne. La transmission radio 3 permet au camion d'informer l'ordinateur 4 du contenu de la boîte noire. Cette information sera traitée dans l'ordinateur pour établir la position des camions et enfin afficher toute l'information nécessaire au terminal du contrôleur 5.

Puisque l'ordinateur est en mesure de connaître où sont les camions il sait aussi à quel moment ils requièrent une nouvelle assignation. L'ordinateur 4 peut décider de ces assignations et les transmettre au camion via la communication radio 3 pour afficher sur un écran numérique 2 le code associé à la nouvelle destination du camion.

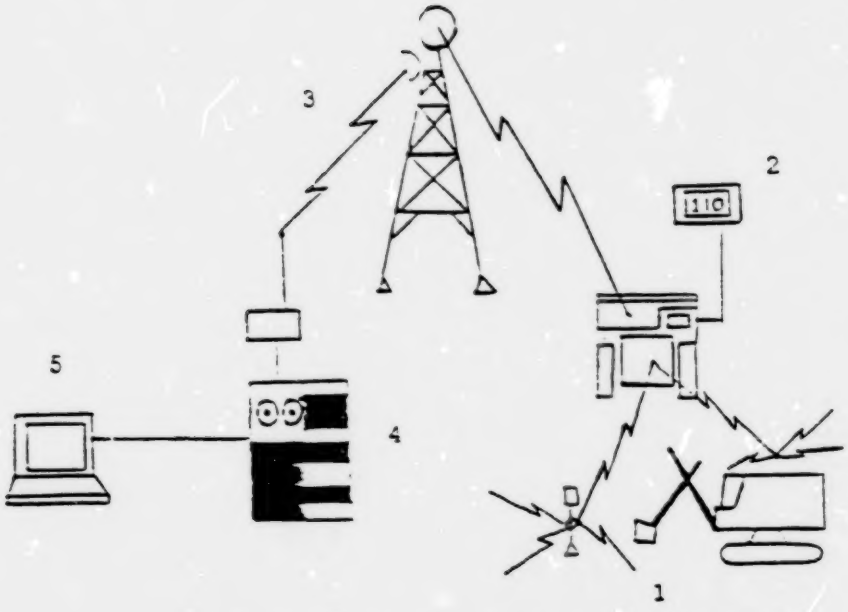


Fig. 5 : Le système de communication.

La méthode de décision développée pour cette étape considère, en plus du camion à assigner, les prochains camions qui seront disponibles. Elle réalise alors l'affectation optimale d'une dizaine de camions aux prochaines pelles qui seront disponibles. C'est une amélioration importante par rapport à Charlemagne, actuellement en opération à la mine du Mont-Wright et plusieurs autres systèmes qui ne considèrent qu'un camion à la fois [Charlemagne, 79]. Ces décisions à courte vue peuvent être assez loin de l'optimum.

Introduisons la notation nécessaire à la formulation du problème d'affectation :

$\{c=1,\ldots,C\}$ = l'ensemble des prochains camions qui seront disponibles.

$\{p=1,\ldots,P\}$ = l'ensemble des prochaines pelles qui seront disponibles.

A = l'ensemble des arcs d'affectation.

L'arc (c,p) est inclus dans A si la route allant du point de déchargement du camion c vers la pelle p est utilisé dans le plan d'opération.

z_{cp} = variable binaire prenant la valeur 1 si le camion c est affecté à la pelle p.

A^1_p = attente moyenne d'un camion à la pelle p qui a été calculée par le plan.

A^2_p = attente moyenne de la pelle p entre deux camions qui a été calculée par le plan.

E^1_{cp} = espérance de l'attente du camion c s'il est assigné à la à la pelle p.

E^2_{cp} = espérance de l'attente de la pelle p si le camion c lui est assigné.

Les espérances E^1_{cp} et E^2_{cp} sont calculées à partir de l'information obtenue en temps-réel par l'ordinateur sur la position des camions et sur les temps de parcours et de chargement. Des distributions d'Erlang sont utilisées pour ce calcul.

C_{cp} = Le coût d'affecter le camion c à la pelle p mesurant l'écart par rapport au plan est défini par la formule suivante :

$$C_{cp} = (E^1_{cp} - A^1_p)^2 + (E^2_{cp} - A^2_p)^2 \qquad [11]$$

Le problème d'affectation se formule de la façon suivante :

$$\min \sum_{c=1}^{C} \sum_{p=1}^{P} C_{cp} z_{cp} \qquad [12]$$

$$\sum_{c=1}^{C} z_{cp} \leq 1 \qquad p=1,\ldots,P \qquad [13]$$

$$\sum_{p=1}^{P} z_{cp} = 1 \qquad c=1,\ldots,C \qquad [14]$$

$$z_{cp} \in \{0,1\} \qquad c=1,\ldots,C,\ p=1,\ldots,P \qquad [15]$$

L'objectif mesure l'écart total par rapport au plan, la contrainte [13] assure que chaque pelle reçoit au plus un camion et la contrainte [14] assure que chaque camion est affecté à une seule pelle.

Une des innovations principales de ce modèle réside dans son objectif assurant l'affectation des camions en accord avec le plan tout en profitant des aléas des temps d'opération. D'autres modèles proposent un objectif basé sur l'écart entre l'estimé de l'heure d'arrivée du camion à la pelle et l'heure à laquelle il est attendu suivant le plan [White, 83]. L'heure attendue est donnée par les fréquences prévues par le plan en considérant des camions également espacés. Cette méthode a l'inconvénient de ne pas profiter des chargements plus rapides pour envoyer plus de camions. D'autre part, elle continue à envoyer les camions à la même fréquence même si le temps de chargement s'allonge et que les camions attendent. Une telle mesure produira des problèmes de fonctionnement pour les pelles très occupées présentant une variation importante du temps de chargement. Avec l'objectif proposé, notre modèle tente de reproduire les attentes des pelles et des camions qui ont été calculées par le plan. La fig. 6 illustre qu'avec cet objectif le modèle a tendance à reproduire les mêmes surfaces hachurées entre les camions indépendamment de la longueur des chargements.

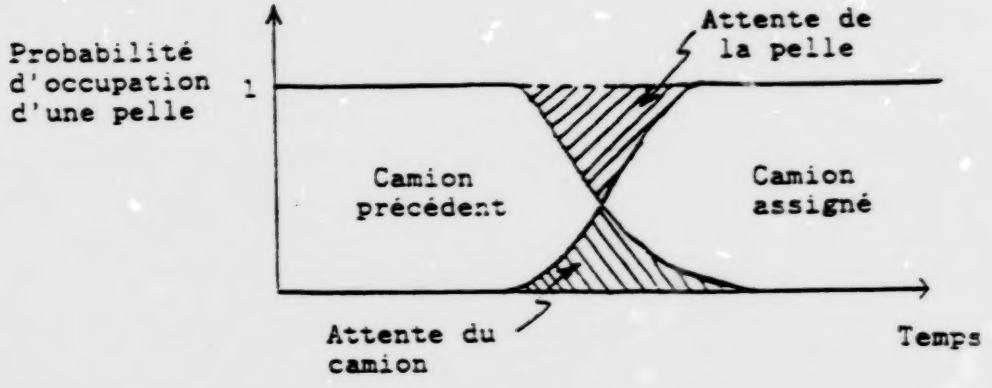


Fig. 6 : Évaluation des probabilités d'attente pour une affectation.

Ainsi, quand les temps de chargement augmentent, les camions sont plus espacés et plus rapprochés quand les temps de chargement diminuent. En moyenne, les camions arrivent à la fréquence prévue par le plan mais, en plus, leur espacement est synchronisé avec les fluctuations de la vitesse des pelles.

Le problème d'affectation d'une dizaine de camions est résolu de façon optimale en moins d'un quart de seconde sur PDP-11. Ce problème est résolu à chaque fois qu'un camion est disponible pour affectation. Le problème d'affectation est résolu à l'intérieur de la procédure suivante selon une méthode d'horizon fuyant.

Procédure d'affectation des camions :

1- Interrogation des camions et estimation des heures où chaque camion et chaque pelle seront disponibles;

2- Résolution du problème d'affectation pour une dizaine de camions;

3- Communiquer l'affectation au(x) camion(s) disponible(s) pour affectation, oublier les affectations des camions encore occupés, retourner en 1.

3. EXPÉRIMENTATION

Nous verrons par la suite que la production estimée par le modèle de planification peut être réalisée par le modèle de contrôle en temps-réel. Dans un premier temps, nous avons mesuré les améliorations que nos modèles pouvaient apporter à la production réalisée à Mont-Wright avec le système Charlemagne. Cette expérience a été réalisée en comparant la production actuelle et la production prévue par notre modèle de planification.

À partir des statistiques d'opération de la mine, nous avons choisi une période de 2h 30 sans fluctuation des nombres de pelles et de camions

et où la teneur du minerai extrait par chaque pelle n'a pas varié. Avec les données de temps de chargement, déchargement, parcours, un plan d'opération a été calculé et ses résultats ont été comparés avec la production et les attentes observées à Mont-Wright dans les mêmes conditions. Pendant cette période, 6 pelles et 15 camions étaient utilisés et l'objectif de teneur était de 0,31 (±0,005). Les résultats sont présentés dans le tableau 7.

	PRODUCTION (#Voy.)			ATTENTE CAMIONS (Min.)	ATTENTE PELLES (Min.)	TENEUR DU MELANGE
	Minerai	Stérile	Tot.			
PLAN	65.4	64.7	130.1	73.3	274.1	.3107
MONT-WRIGHT	65.0	51.0	116.0	267.5	338.7	.317

Tableau 7 : Plan d'opération vs Mont-Wright.

Le plan d'opération nous donne 14 voyages de plus que la production effectuée à Mont-Wright pour la même période. Ce qui fait une différence de 11% du nombre de voyages. D'autre part, on remarque que la teneur du mélange produit à Mont-Wright était de 0,317 alors que celle du plan d'opération était beaucoup mieux avec 0,3107. Il est évident que le gain réalisé sur la production est attribuable à la diminution du temps d'attente des camions. En effet, on remarque une diminution de 72,5% du temps d'attente des camions dans le calcul du plan d'opération par rapport à ce qui a été réalisé à Mont-Wright.

Il est difficile de comparer les résultats du contrôle en temps-réel avec la production obtenue par un autre système. On ne peut pas faire fonctionner en même temps deux systèmes de contrôle et comparer leurs performances car un seul système doit communiquer les affectations aux camions. De même, on ne peut pas les faire fonctionner un après l'autre

dans les mêmes conditions; une fois que le minerai a été transporté, il n'est plus là pour évaluer le deuxième système.

Pour obtenir une situation permettant de comparer deux systèmes de contrôle, nous avons développer une simulation de la mine. Le simulateur génère aléatoirement les temps de parcours, de chargements et de déchargements des camions et met à jour la banque de données du système. Il remplace l'interrogation des camions qui permet de connaître leurs heures de passages près des bornes émettrices dans la mine. Le simulateur génère des temps d'activité suivant des lois de Erlang avec des moyennes et des écarts-types correspondant aux valeurs observées. La figure 7 représente l'échange d'information entre l'algorithme de contrôle et le simulateur via la banque de données.

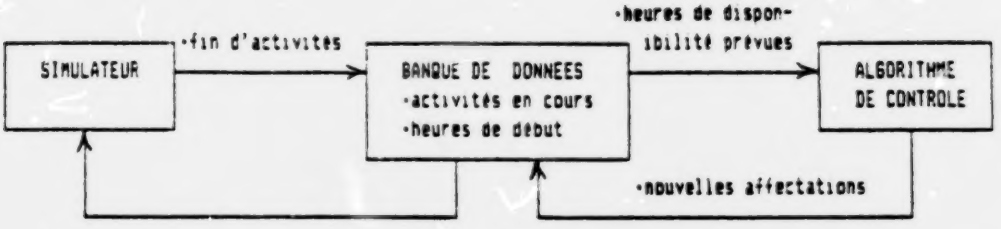


Fig. 8 : Contrôle des opérations dans une mine simulée.

Une comparaison a été effectuée entre Charlemagne et le nouveau système de contrôle des opérations, en utilisant le simulateur pour reproduire un fonctionnement semblable à 15 heures d'opération. Cette durée se divise en 12 périodes avec des nombres de pelles et de camions et des temps moyens d'activité distincts. Un plan d'opération a été calculé pour chaque période et le simulateur a été utilisé avec les distributions appropriées. Les résultats sont présentés dans le tableau 9.

	PRODUCTION PAR CATEGORIE (0voy.)									TEMPS D'ATTENTE (min.)					
PERIODE	PLANIFICATION			CONTROLE			CHARLEMAGNE			PLANIFICATION		CONTROLE		CHARLEMAGNE	
	MIN.	STE.	SUR.	MIN.	STE.	SUR.	MIN.	STE.	SUR.	CAMIONS	PELLES	CAMIONS	PELLES	CAMIONS	PELLES
23H30-00H30	23.6	19.2	9.4	25	20	9	23	18	7	27.95	172.62	30.7	109.1	65.30	99.40
00H30-2H30	50.4	19.8	23.4	55	17	25	54	17	18	117.08	146.96	119.8	144.0	157.0	96.80
2H30-3H30	20.9	7.45	8.65	20	9	9	21	7	8	14.95	74.89	29.4	74.84	32.3	85.30
3H30-4H30	20.9	7.45	8.65	19	8	10	24	5	5	14.9	74.89	19.4	68.11	41.4	90.7
4H30-5H30	24.7	18.4	8.7	26	20	8	24	20	9	17.5	130.48	9.7	141.1	15.0	137.3
5H30-6H30	20.7	29.7	8.1	20	27	9	21	32	5	29.4	104.8	47.7	107.5	52.3	95.8
6H30-7H30	20.7	29.7	8.1	20	28	7	22	32	5	29.4	97.4	29.9	109.8	54.3	97.4
7H30-8H30	21.5	23.0	8.8	20	24	10	23	25	7	33.08	77.17	42.1	79.8	43.2	73.0
13H30-15H30	34.2	63.8	10.4	34	61	10	37	58	8	35.88	279.2	20.1	272.7	30.0	302.7
16H30-17H30	24.4	10.3	8.5	25	11	7	24	8	7	12.59	107.4	36.9	100.2	28.2	89.5
17H30-18H30	19.5	19.7	11.0	21	19	8	21	20	11	46.4	51.54	38.5	64.3	60.4	68.8
21H30-23H30	37.4	48.6	20.8	35	54	20	39	49	16	96.8	116.8	96.8	116.9	125.8	103.3
TOTAL	318.9	297.1	134.5	320	298	132	333	291	103	475.93	1434.2	521.0	1388.35	705.2	1340.0
	750.5			750			727								

Tableau 9 : Comparaison des temps d'attente et des productions.

On remarque d'abord une très bonne correspondance pour chaque période entre les nombres de voyages prévus par le plan et ceux réalisés par notre système de contrôle, autant pour le minerai que pour le stérile. La correspondance est encore plus forte au total. On peut donc affirmer :

1) Le contrôle des opérations suit le plan.

2) Les plans sont donc réalistes.

On remarque ensuite un gain de production de 3,16% par rapport à Charlemagne. La période de 15 heures avec 750 voyages est assez longue pour que ces résultats soient significatifs malgré la variance des durées

d'activités simulées. On remarque de plus la réduction de l'attente des camions de 35% par rapport à Charlemagne. Ce gain de productivité n'est pas aussi important que celui de la première comparaison. Lors de la comparaison avec la réalité, la disponibilité des pelles était assez restreinte et l'attente des camions plus grande. On observe avec Charlemagne, dans cette situation, un rapport "attente camions/attente pelles" ≈ 4/5 et une attente de 12% des camions. Notre système a pu réduire cette attente des camions de 12% à 3% dans ce cas. Lors des simulations, la disponibilité des pelles était plus grande et l'attente des camions moins importante. On obtient avec Charlemagne, dans ce cas, un rapport "attente camions/attente pelles" ≈ 1/2 et une attente de 6,5% des camions. Notre système a pu réduire l'attente des camions de 6,5% à 4%. En résumé, le gain est moins grand dans le deuxième cas surtout parce que l'attente y était moins grande, étant donné une plus grande disponibilité des pelles.

4. CONCLUSION

Le système proposé permet d'obtenir de très bons résultats sur la quantité et la qualité du minerai extrait et ce, dans des temps de calcul très faibles grâce à l'utilisation d'algorithmes d'optimisation très efficaces. En plus des gains au niveau de l'opération illustrés dans ce texte, ce système permet des gains au niveau de la planification grâce à nos deux premiers modules. Les modules de choix des équipements et de plan d'opération permettent de réaliser des conditions où il est possible d'atteindre en même temps les objectifs de qualité et de quantité. En effet, plutôt que de constater en fin de journée que les conditions étaient malheureusement peu favorables et que les objectifs n'ont pas été atteints, ces modules permettent d'estimer la production prévue et de changer les conditions

s'il n'est pas possible de rencontrer les objectifs. De plus, ces modules permettent d'ajuster à la hausse les objectifs si les essais montrent qu'il est possible de faire mieux.

REFÉRENCES

CHARLEMAGNE (1979). Manuel de répartition des camions. La compagnie minière Québec Cartier.

McINNIS, D. (1985). Planification du transport du minerai pour programmation non-linéaire; mémoire de maîtrise, Département d'informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal.

ORISEK, I. et Diantonio K.K. (1986). Productivity Improvement with Automatic Truck Dispatching, a Case Study. Society of Mining Engineering.

WHITE, J.W., ARNOLD, M.J., et CLEVENGER, J.G. (1981). Automated Open Pit Mine Dispatching at Tyrone. Mining Information Systems Technology Exchange Seminar.

WHITE, J.W. et OLSON, J.P. Olson (1983). Recent Developments in Computer Based Dispatching. Society of Mining Engineering of AIME.

YOUNG, C.K., RAKSHIT, A. et KOLB, W.E. (1984). Automatic Truck Dispatching Using a Micro-Computer. Society of Mining Engineering of AIME